



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ TURBÍNOVÝCH ROTORŮ

WELDING TECHNOLOGY OF TURBINE ROTORS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vít Pivoňka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Vít Pivoňka**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.**
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Technologie svařování turbínových rotorů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Moderní turbínové rotory jsou zpravidla svařovány ze tří kovaných dílů. Práce se nebude zabývat svařitelností žárupevných materiálů ani problematikou heterogenních svarů. Budou popsány metody svařování jak v kořenové, tak i výplňové části svaru a také některé destruktivní zkoušky svarového spoje.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Metody svařování kořene
- 2) Metody svařování výplně
- 3) Svařování do úzké mezery
- 4) Svařování svazkem elektronů
- 5) Zhodnocení navržené technologie svařování: hodnocení makro a mikrostruktury spoje, průběhu tvrdosti jednotlivých pásem TOO a svarového kovu.

Seznam doporučené literatury:

AMBROŽ, O., B. KANDUS a J. KUBÍČEK. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0.

ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov. Bratislava. ETERNA PRESS 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5.

FOLDYNA V. a kol. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771--5-3.

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-3-2-3

MESSLER, R. W. Jr.. Principles of Welding. New York, USA. 1999. 662 s. ISBN 0-471-25376-6.

Příručka pro svařování pod tavidlem. Technická příručka ESAB. Překlad z angl. originálu r.č.XA00136020

TURŇA, M. Špeciálne metódy zvarovania. 1. vyd. Bratislava: ALFA. 1989. 384 s. ISBN 80- 05-00097-9

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

PIVOŇKA Vít: Technologie svařování turbínových rotorů.

Práce se zabývá veškerými možnostmi, kterými lze svařit turbíny rotorů, a to jak kořen, tak výplň svaru. Všechny tyto metody jsou důkladně rozebrány a popsány jejich vlastnosti, především velikost vneseného tepla při svařování turbínových rotorů. Dále je v této práci popsána stavba struktury pomocí metalografického šetření a zkoušky svarů a materiálů, které se provádějí z důvodu kontroly, zda daný materiál a metoda svařování je vhodná ke svařování turbínových rotorů. V experimentální části jsou popsány všechny svary zhotovené za různých svařovacích parametrů, z těchto svarů je vybrán jeden, který dosáhl nejlepšího provaření kořene svaru. Tento svar je dále zkoumán na tvrdost a změnu mikrostruktury po svařování.

Klíčová slova: Svařování, turbínový rotor, zkoušky, metalografie, plazmové svařování, mikrostruktura

ABSTRACT

PIVOŇKA Vít: Turbine rotor welding technology

The paper deals with all the possibilities which can be used to weld the rotors of turbines, both the root and the filler welding. All these methods are thoroughly analyzed and their properties are described, especially the size of the heat input by welding of rotors of turbines. Further in this work is described the organization of the structure by means of a metallographic survey and a test of welds and materials, which are performed to check whether the material and the welding method are suitable for welding of rotors of turbines. In the experimental part are described all welds made by different welding parameters, one of these welds is chosen to achieve the best welding of the weld root. This weld is further investigated for hardness and change of microstructure after welding.

Keywords: Welding, turbine rotor, tests, metallography, plasma welding, microstructure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

PIVOŇKA, Vít. *Technologie svařování turbínových rotorů*. Brno, 2017. 32s, 1 příloh, CD. bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Třešti dne 26. 5. 2017

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto panu doc. Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za odborné vedení, poskytnuté rady a připomínky, které mi byly přínosem ke zdárnému dokončení bakalářské práce.

Rád bych touto cestou také poděkoval svým rodičům a své sestře za jejich trpělivost a podporu, kterou mi poskytli v průběhu celého studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	

ÚVOD	9
1 METODY SVAŘOVÁNÍ U TURBÍNOVÝCH ROTORŮ	10
1.1 Svařování metodou WIG (TIG)	10
1.1.1 Inertní ochranné plyny	11
1.1.2 Svařovací hořák WIG	11
1.2 Plazmové svařování	12
1.2.1 Úprava svarových ploch a svařitelnost materiálů	13
1.3 Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem	14
1.3.1 Regulace svařovacího procesu	14
1.3.2 Volba svařovacích parametrů, přídavné materiály	15
1.3.3 Svařování do úzké mezery	15
1.4 Svařování svazkem elektronů	16
1.4.1 Vytvoření svaru	17
1.4.2 Svařitelnost materiálů	17
2 ZKOUŠKY SVARŮ A MATERIÁLŮ	18
2.1 Zkouška tahem	18
2.2 Zkouška vrubové houževnatosti	20
2.3 Zkoušky tvrdosti	21
2.3.1 Zkoušky tvrdosti - statické	21
2.3.2 Zkoušky tvrdosti – dynamické	23
2.4 Metalografické šetření	24
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	25
3.1 Materiál a svařovací zařízení	25
3.2 Provedení zkoušky	26
3.3 Hodnocení svarů v osazení	27
3.4 Měření tvrdosti vzorku	29
3.5 Mikrostruktura	30
4 ZÁVĚRY	31

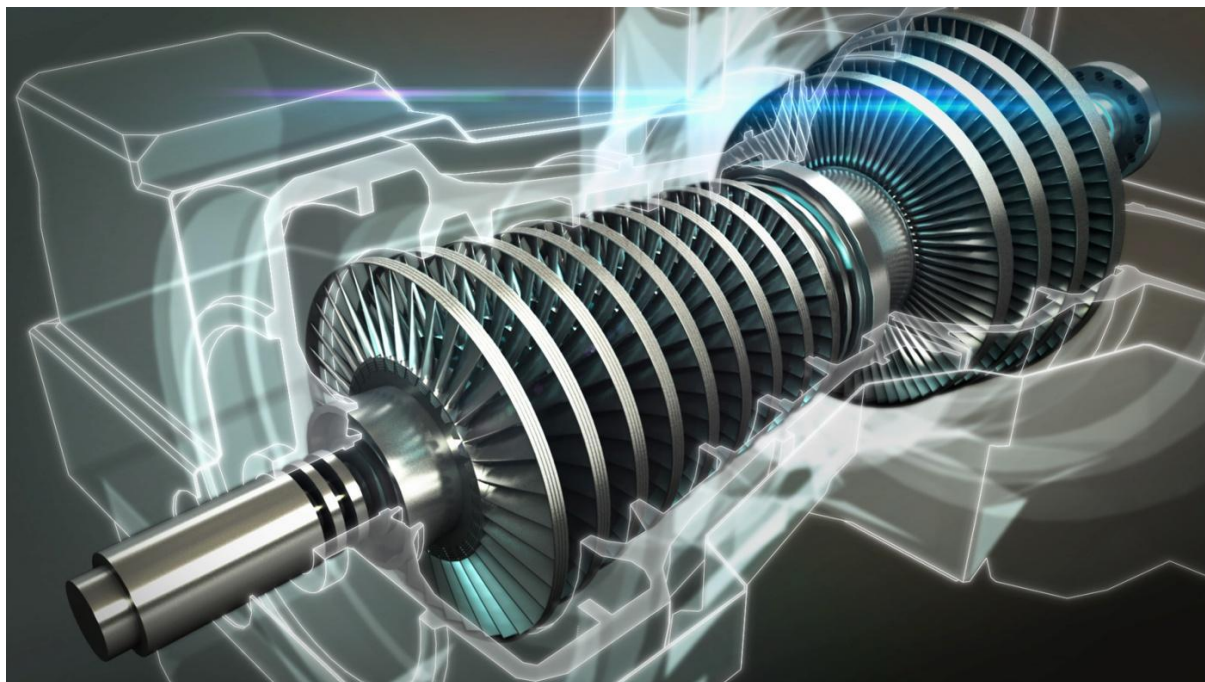
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů	
Seznam použitých zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [7], [19]

V této bakalářské práci se zabývám metodami svařování turbínových rotorů.

V teoretické části postupně popisuji metody svařování WIG, plazmové svařování, svařování elektrickým obloukem pod tavidlem a svařování svazkem elektronů. Jednotlivé uvedené metody se používají pro svařování některé z částí svaru, a to buď pro kořen svaru, pro výplň svarové mezery, nebo metoda, kterou lze svařit obě části svaru. Dále v teoretické části rozebírám zkoušky svarů a materiálů. Popisuji hlavně tepelné ovlivnění materiálu při svařování a mechanické vlastnosti svaru.

V praktické části nejprve popisuji svařovací zařízení a materiál, který bude použit pro experimentální zkoušku. Dále popisuji průběh experimentu a vyhodnocení svaru, jakožto provaření svaru a tvorbu „Keyhole“ na kořeni a povrchu svaru. Poté se zaměřuji na zkoušky tvrdosti, a to na porovnání tvrdosti svaru a základního materiálu. Nakonec hodnotím změny mikrostruktury po svařování od základního materiálu, přes tepelně ovlivněnou oblast, až ke svarovému kovu.



Obr. 1 Rotor turbíny [19]

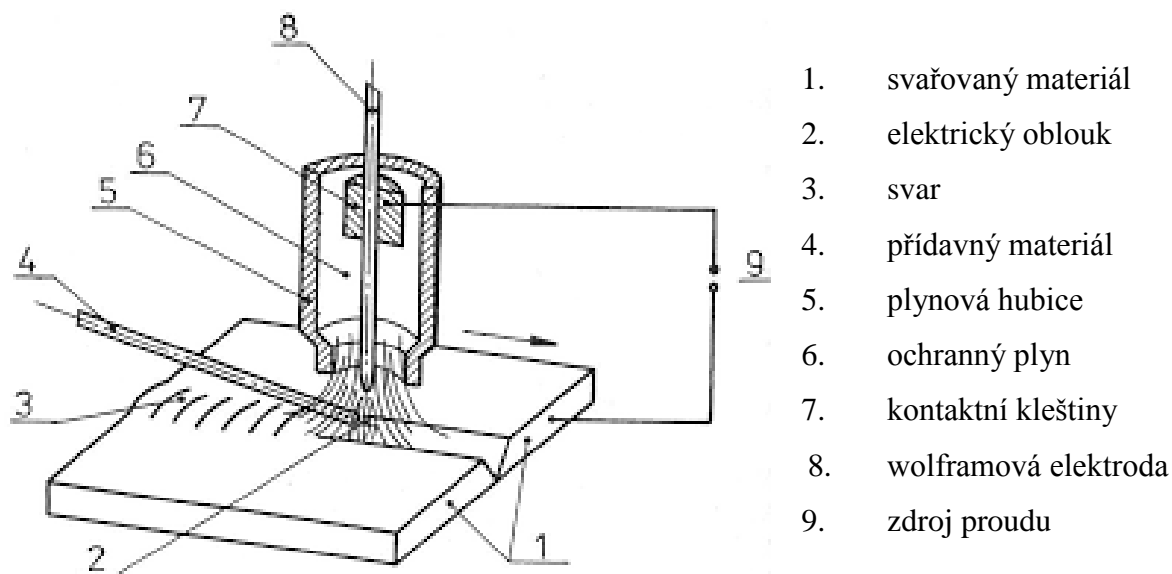
1 METODY SVAŘOVÁNÍ U TURBÍNOVÝCH ROTORŮ [6], [7]

Každá svařovací metoda pro svařování turbínových rotorů má své výhody a nevýhody, které nám určují, jakou metodu můžeme vybrat. Některá kritéria, která nám určují metodu svařování, jsou: tepelně ovlivněná oblast, množství přídavného materiálu, doba potřebná k vytvoření svaru, tuhost svaru a svařování různorodých materiálů.

1.1 Svařování metodou WIG (TIG) [6], [7]

Zkratka WIG (wolfram inert gas) pochází z němčiny a v překladu znamená - svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu. Zkratka TIG (Tungsten Inert Gas) pochází z angličtiny a překládá se stejně, jako zkratka WIG, to znamená, že obě tyto zkratky vyjadřují to samé. Svařování metodou WIG se používá čím dál častěji, z důvodu jeho vysoké kvality spojů, operativnosti řízení procesu svařování a velkému stupni robotizace a automatizace. Metodou WIG se můžou svařovat různorodé materiály (ocel s bronzem, mědí). Používá se i pro svařování kořene a výplně u svařování turbínových rotorů.

U svařování metodou WIG se elektroda neodtavuje. Oblouk hoří mezi základním materiálem a netavící se elektrodou. Ochranu před nečistotami okolní atmosféry zajišťuje netečný plyn, který chrání elektrody i tavné lázně. Ochranné plyny, které se používají, jsou helium, argon nebo jejich směsi. Přídavný materiál může být buď ve formě drátu a přidávat se ručně (obr. 2) nebo může být automatické svařování s podavačem drátu. Při automatickém svařování se rychlost podávání drátu přizpůsobuje rychlosti svařování.



Obr. 2 Princip svařování WIG [7]

Elektrody pro svařování metodou WIG se vyrábějí ze spékaného wolframu (W), ten má teplotu tavení 3380°C. Elektrody mohou být vyráběny buď bez příměsí o čistotě 99,9% W, nebo legované oxidy kovů. Kovy pro legování se používají – thorium (Th), cer (Ce), lanthan (La), zirkon (Zr) nebo yttria (Y). Kovy jsou v elektrodě rovnoměrně rozptýleny. Přidáním oxidů se nám sníží teplota ohřevu elektrody o 1000°C, alelepší se zapalování oblouku, prodlouží se životnost alepší se stabilita oblouku díky vyšší emisi elektronů. Elektroda musí být z jednoho konce obroušena do tvaru kužele, který má vrcholový úhel závislý na svařovacím proudu.

1.1.1 Inertní ochranné plyny [7]

Inertní ochranné plyny chrání svarovou lázeň a její okolí a netavící se elektrodu před vlivy okolního prostředí, hlavně proti naplynění a oxidaci. Zároveň zlepšují podmínky k zapálení oblouku a udržují oblouk stabilní. Pomáhají přenést teplo do svaru a udržet jeho tvar. Hlavními plyny, které se používají pro ochranu svaru, jsou argon a helium popř. jejich směsi.

Nejčastěji používaný ochranný plyn je argon, a to proto, že se může použít pro všechny svařitelné materiály a současně je jeho výhodou nízká cena. Argon je 1,4krát těžší než vzduch, z toho důvodu je to výborný ochranný plyn.

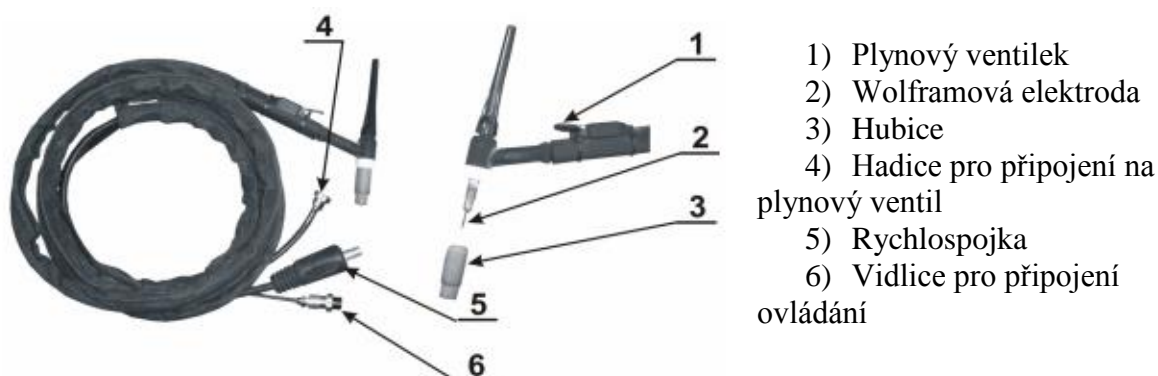
Dalším ochranným plynem je helium. Helium je velmi lehký plyn, proto je potřeba při svařování vyššího průtoku, aby byla dosažena dostatečná ochrana. Helium má vyšší ionizační potenciál než argon, proto se hůře zapaluje oblouk a je nestabilní při větší délce hoření. Helium se používá proto, že má vysokou tepelnou vodivost, a tak je přenos tepla v oblouku vysoký.

Ochranný plyn zlepšuje zapálení a hoření oblouku, pomáhá tím vytvořit ionizované prostředí. Dále ovlivňuje metalurgicky kapky přídavného materiálu v době, když se tvoří a přenáší obloukem a nakonec i ve svarové lázni. Ovlivňuje tvar, velikost a rychlost přenosu kapek obloukem. Také pomáhá ke zlepšení povrchu svaru tím, že je hladší a přechod mezi svarem a základním materiálem je plynulejší. Ochranný plyn velmi ovlivňuje svařovací oblouk, má vliv na jeho tvar, velikost a síly. Výrazně ovlivňuje i svar, hlavně jeho tvar a rozměry průřezu svaru. Jsou také ovlivněny mechanické vlastnosti, kvalita a celistvost svarového spoje.

1.1.2 Svařovací hořák WIG [11], [7]

Svařovací hořák (obr. 3) plní nejvíce funkcí, musí zajistit přívod elektrického proudu k elektrodě, přesné umístění a zajištění wolframové elektrody, průtok chladicí kapaliny a průtok ochranného plynu. Hořáky mohou být dvojího typu, a to buď chlazené plynem, které jsou do 150 A. Nebo chlazené vodou, které se používají pro vyšší napětí až 500 A.

Pro dobré proudové napájení a tuhé upnutí wolframových elektrod jsou hořáky opatřeny vyměnitelnými kleštinami. Pokud by nebylo upnutí dostatečně tuhé, docházelo by k velkým přechodovým odporům mezi wolframovou elektrodou a kleštinou.



Obr. 3 Svařovací hořák [11]

1.2 Plazmové svařování [2], [6], [7], [19]

Tato metoda je vhodná pro svařování kořene u svařování turbínových rotorů.

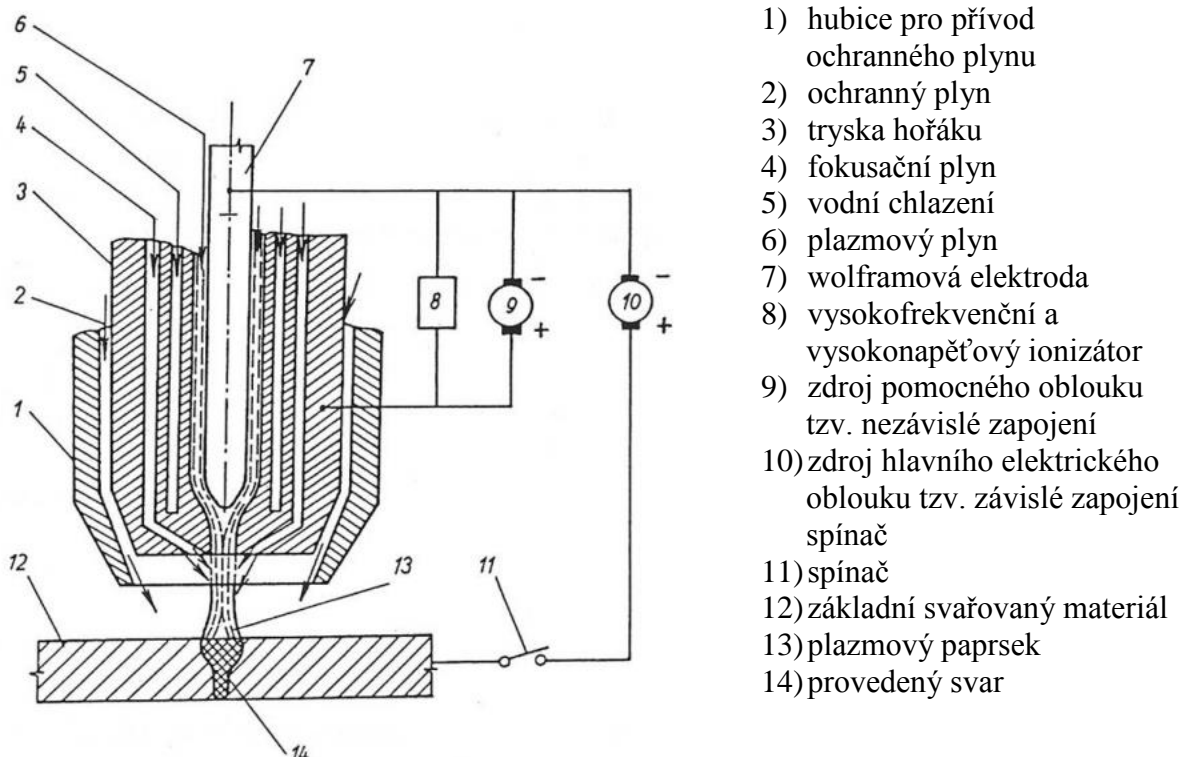
Pro vznik plazmy je zapotřebí ionizace plynu (mechanická nebo tepelná), taková, aby nastalo vyražení nebo uvolnění elektronů z vnějších orbitů atomu. Na ionizaci plynů je potřeba velké množství energie. Elektrony, které jsou uvolněné, vedou v plazmě elektrický proud. Zvenčí se plazma jeví elektricky neutrální.

U prvků, které jsou dvouatomové (vodík, kyslík a dusík), musí nejprve nastat disociace plynu, při níž dojde k rozložení molekul na atomy. Po disociaci dvouatomových plynů může začít ionizace.

Svařování je odvozené od metody WIG. Elektrody jsou wolframové s přídavkem 2% ThO₂. Rozdíl mezi metodou WIG a svařováním pomocí plazmy je ten, že nahradíme keramickou hubici kovovou tryskou, která je chlazená vodou nebo plynem. Tvar trysky pro svařování je válcový a musí se upravovat výtokové rychlosti, kvůli vyfouknutí taveniny ze spáry jinak by docházelo k řezání materiálu.

Zapojení hořáku je dvojího typu (obr. 4).

- Závislé zapojení (přenesený oblouk), je zapojení užívané pro základní materiály vodivé a energeticky výhodné.
- Nezávislé zapojení (nepřenesený oblouk), je zapojení pro materiály nevodivé, tryska je anodou a je zde menší účinnost



Obr. 4 Princip plazmového hořáku [7]

Pro svařování pomocí plazmy se používají tři druhy plynu:

- Plazmový: Ar, Ar+H₂, Ar + He, s průtokem 0,5 až 9 l/min.
- Fokusační, pro zúžení plazmového paprsku, s průtokem 3 až 18 l/min.
- Ochranný, pro ochranu svarové lázně proti oxidaci, s průtokem 2 až 20 l/min, (u aktivních materiálů Ti, Zr, Ta se průtok navýší na 20 až 30 l/min).

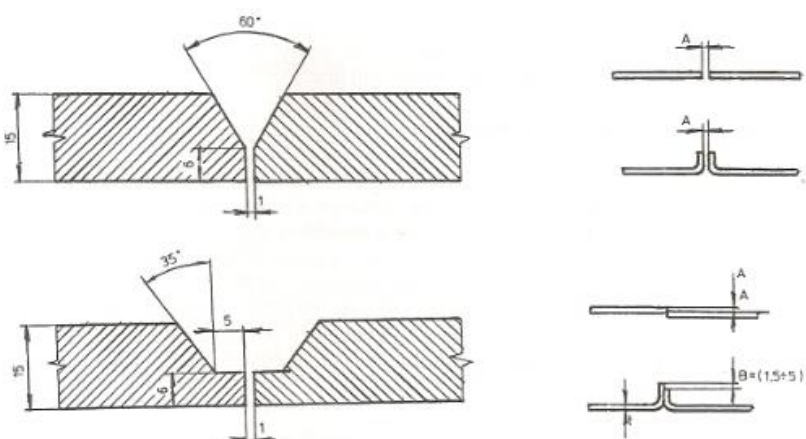
Vlastnosti, kterými se vyznačuje běžná technická plazma:

- Ve stejný čas s pružnými srážkami molekul dochází k výskytu nepružných srážek, které vedou k disociaci a ionizaci plynu.
- Chemicky stejnorodý plyn se mění na směs iontů, fotonů, atomů, elektronů atd.
- Směs částic v plazmě je kvazineutrální, tzn. počet záporných a kladných částic je skoro stejný.
- Na pohyblivosti elektronů závisí elektrická vodivost plazmy.
- Magnetické a elektrické pole silně působí na plazmu.

1.2.1 Úprava svarových ploch a svařitelnost materiálů [7]

Pomocí plazmy lze svařovat vysokou rychlostí. Je zde dobrý poměr šířky a hloubky (1:1,5 až 1:2,5) a spolehlivé provaření kořene. Dají se svařovat veškeré druhy ocelí, měď, titan, molybden, nikl, hliník a jejich slitiny. Pro vysokolegované oceli, o tloušťce 2 až 10 mm, jsou parametry svařování tyto: napětí 28 až 40 V a proud 110 až 300 A. Takovéto hodnoty se mohou nastavit také pro svařování niklu a jeho slitin. Dále hodnoty o 15 až 20 % nižší lze nastavit pro svařování titanu. Pro výše zmiňované hodnoty se rychlosti pohybují mezi 85 až 20 cm · min⁻¹. Svařování hliníku se provádí střídavým proudem.

Kvůli dynamickému účinku plazmového paprsku, který je vysoký, lze svařovat tupé svary typu I bez úpravy svarového úkosu, kdy je spolehlivé provaření kořene i do větších tlouštěk.



(obr. 5) U nelegovaných a středně legovaných ocelí se hrany upravují od 6 mm. Pro nerezavějící austenitickou ocel úpravy úkosu před svařováním jsou od 10 až 12 mm, s mezerou 0,5 až 1 mm.

Obr. 5 Úpravy svarových ploch pro plazmové svařování [7]

Svařování plazmou zajišťuje:

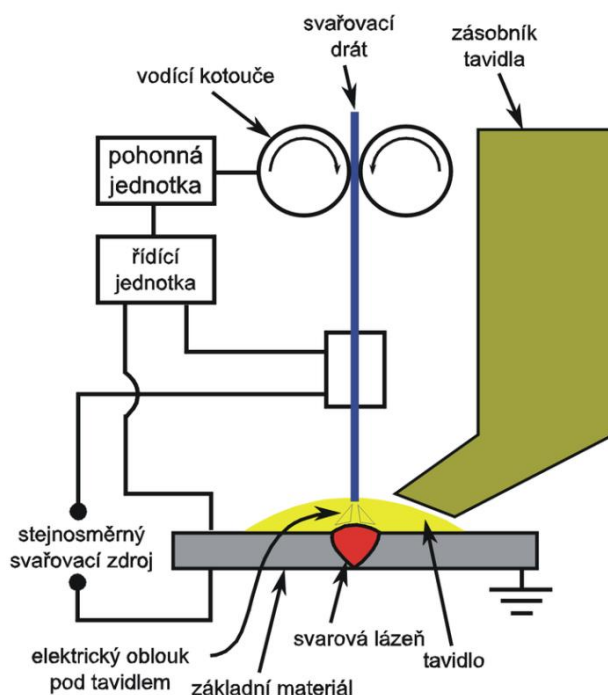
- ✓ Velmi dobrý tvar i průvar svaru.
- ✓ Nemusí být podložení kořene při svařování.
- ✓ Možnost mechanizace.
- ✓ Svar bez bublin a pórů (vysoká čistota svaru).
- ✓ Lehká úprava svarových ploch.
- ✓ Svarový spoj má dobré mechanické vlastnosti.
- ✓ Lze svařovat impulsním i střídavým proudem.

1.3 Svařování elektrickým obloukem pod tavidlem [7], [16], [18]

Metoda svařování elektrickým obloukem pod tavidlem se používá zejména proto, že je u ní větší množství odtaveného svarového kovu než u jiných způsobů svařování. Metoda může být automatizovaná a proto tedy přesná a velmi rychlá (2krát až 5krát rychlejší než ruční svařování), ale přesnost výroby základního materiálu a požadavky na čistotu jsou větší než u ručního svařování obalenou elektrodou. Při svařování elektrickým obloukem pod tavidlem bývá 6krát větší proudová hustota než při svařování elektrickým obloukem obalenou elektrodou.

Elektrický oblouk je mezi drátem (elektrodou) a základním materiálem v mezeře, která je pod roztavenou vrstvou tavidla. Drát se postupně odtavuje a vyplňuje mezeru svařovací dutiny. Drát je holý, protože ochranu nám zajišťuje tavidlo, které se sype na základní materiál v místě svaru (obr. 6). Rychlost odvíjení drátu je poloautomatická nebo automatická.

- Poloha svařování je vodorovná shora (zkratka PA).
- Aby se nám svar ekonomicky vyplatil, musí být delší než 1000mm.
- Svařovat můžeme materiály o tloušťce 3 až 100mm.
- Rozsah svařovacího proudu bývá 200 až 2000A.
- Rozsah napětí, který je na oblouku bývá 20 až 50V.
- Průměr odtavovaného drátu (přídavného materiálu) je 2 až 8 mm.
- Svařovací proud se používá střídavý i stejnosměrný.



Obr. 6 Princip technologie svařování pod tavidlem [18]

1.3.1 Regulace svařovacího procesu [7]

Vzdálenost elektrického oblouku se neustále mění z důvodů nerovností (zkracuje se, prodlužuje se). Kvůli těmto změnám dochází ke změně napětí na oblouku, proto se musí vytvořit regulační podmínky takové, aby byly schopny eliminovat výkyvy délky elektrického oblouku. V dnešní době se délka elektrického oblouku reguluje několika způsoby:

- Podstatou způsobu samoregulace je to, že na oblouku se změní napětí, a to vyvolá i změnu svařovacího proudu, který umožní zpomalit nebo urychlit odtavování drátu tak, aby délka svařovacího drátu byla stejná jako původní před nerovnostmi.
- Regulace pomocí Ward-Leonardova zapojení elektromotoru spočívá v tom, že pokud dojde ke změně napětí na oblouku, změní se otáčky elektromotoru, který pohání zařízení na podávání přídavného materiálu (drátu).

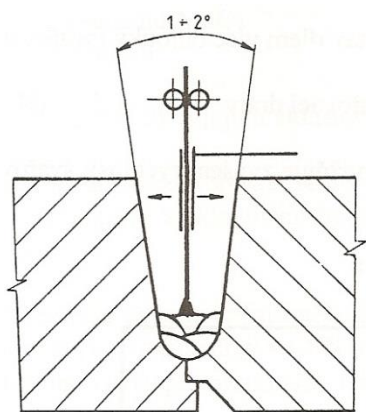
1.3.2 Volba svařovacích parametrů, přídavné materiály [7], [16]

Velikost svaru se udává pomocí šířky svaru, hloubky závaru a převýšení. Nejdůležitější parametry, které nám určují, jak bude svar velký, jsou např.: svařovací proud, průměr drátu, svařovací rychlost, napětí na oblouku a tvar svarové plochy. U menších tloušťek materiálu se pro lepší stabilitu svařovacího oblouku používá stejnosměrný proud.

Přídavný materiál (drát) a tavidlo se volí takové, aby se po svařování svar blížil co nejvíce základnímu materiálu, a to chemickým složením a mechanickými vlastnostmi. Některé skupiny ocelí vhodné pro kombinaci jsou uvedeny v příloze (tab. 1)

1.3.3 Svařování do úzké mezery [2], [7]

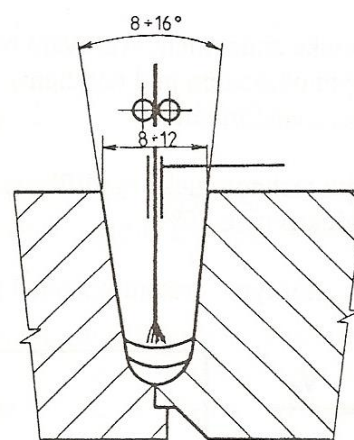
Metoda svařování pod tavidlem do úzké mezery je speciální metoda, která umožňuje snížit spotřebu přídavného materiálu, zbytková napětí ve svaru a zvýšit rychlost svařování. Je důležité správně zvolit materiál, aby struska chladla rychleji. Svařování do úzké mezery se rozděluje na dvě metody.



Obr. 7 Svařování do úzké mezery 1. Varianta [7]

U druhé varianty jsou stěny více rozevřené a to úkosem pod úhlem 8 až 16°. Svařovací oblouk hoří uprostřed úzké svarové mezery, která je v nejširším místě svarového úkosu široká 8 až 12 mm. Svarové housenky jsou kladeny jedna na druhou a to tak, že se vyplní celá šířka svarové mezery na jednu housenku (obr. 8).

Při první variantě jsou stěny zkoseny na 1 až 2°, což je velmi strmé provedení. Svarové housenky se postupně kladou do kouta, jedna na druhou, dokud se nevyplní celá mezera pro svár (obr. 7). Takto kladené housenky umožňují dobré odstranění strusky ze svarových housenek.



Obr. 8 Svařování do úzké mezery 2. Varianta [7]

Metoda svařování elektrickým obloukem pod tavidlem má své výhody.

- ✓ Zvýšení produktivity svařování (2 až 5x oproti svařování obalenou elektrodou).
- ✓ Velký průvar do základního materiálu.
- ✓ Velká tepelně ovlivněná oblast.
- ✓ Vysoká proudová hustota i u tenkých svařovacích drátů.
- ✓ Zmenšení koutových svarů až o 25% (srovnání s obalenou elektrodou).
- ✓ Lepší kvalita svarů.

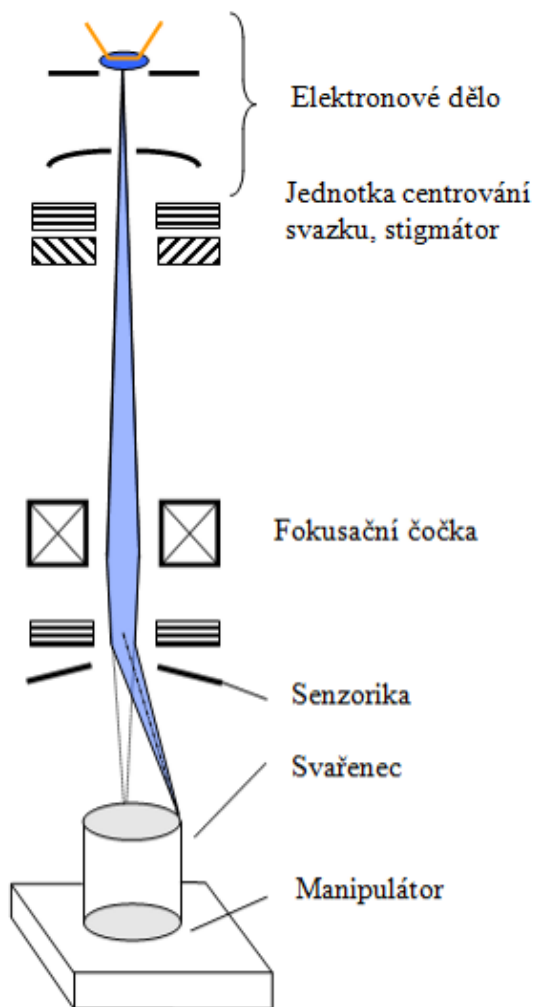
A také své nevýhody.

- ✗ Větší požadavky na čistotu a přípravu svarových ploch.
- ✗ Schovaný svařovací proces a nesnadnost jeho kontroly.
- ✗ Lze svařovat pouze v polohách PA a PB.

1.4 Svařování svazkem elektronů [10], [15], [17], [19]

Tento způsob se řadí do tavného svařování. Metoda závisí na přeměně kinetické energie na tepelnou energii rychle letících elektronů, a to při dopadu na svařovaný materiál.

Jako zdroj elektronů slouží válcová vakuová nádoba, která má na jedné straně přímo nebo nepřímo žhavenou emisní elektrodu a na straně druhé má oddělovací uzávěr, který se dá kombinovat s pozorovací optikou. Zdroj, kde vznikají elektrony, se nazývá elektronové dělo



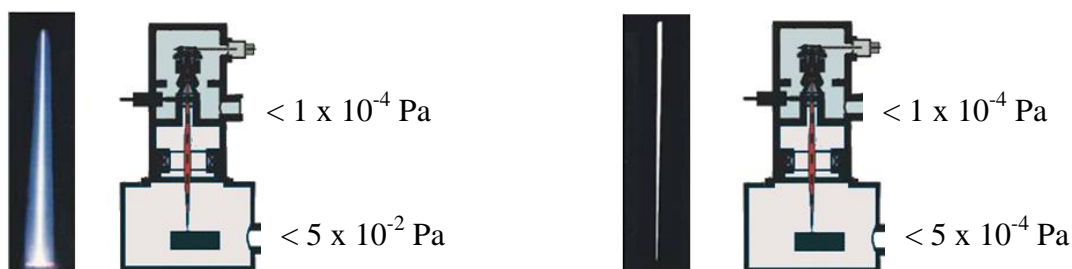
Obr. 9 Zařízení pro svařování svazkem elektronů [10]

nebo elektronová tryska (obr. 9). Ze záporné elektrody jsou uvolněny elektrony a ty se od elektrody odtahují pomocí zaostřovací elektrody. Elektron díky své malé hmotnosti lze urychlit v elektrickém poli na vysokou rychlost. Pokud je potřeba rychlost zvýšit, musí se dosáhnout vysokých napětí, u velmi výkonných zdrojů lze rychlost navýšit až na 75% rychlosti světla.

Pomocí magnetického pole se může svazek elektronů zaostřit tak, aby elektrony dopadali na dané místo dopadu. Toto zaostření je nutné kvůli působení odpudivých sil mezi záporně nabitými elektrony.

Pomocí těchto zařízení se dá svařovat velmi úzkým svazkem elektronů až o průměru 0,05 mm a tloušťky svařovaného materiálu jsou v rozmezí 0,1 až 50 mm. Pokud se svařuje ve vodorovné poloze, tak tloušťka materiálu může být až 400 mm.

Svařování svazkem elektronů musí probíhat za vysokého vakua. Vakuum zajišťuje termoemise elektronů, chemické a tepelné izolace katody a nedovolí, aby se elektrony sráželi s molekulami vzduchu a tím nedocházelo ke zpomalení elektronů a jejich vychýlení z přímé dráhy. Čím je vyšší tlak vakua, tím je přesnější paprsek pro svařování. Můžeme dosáhnout až 5×10^{-4} Pa velikosti vakua (obr. 10).

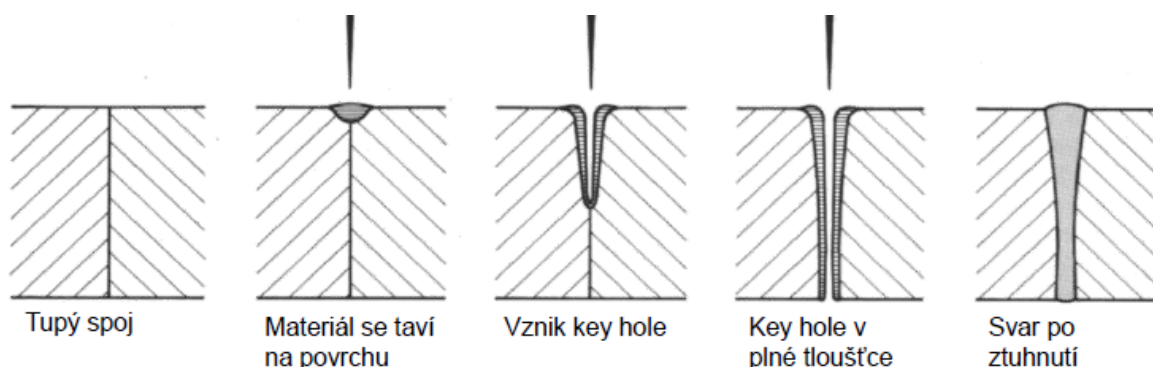


Obr. 10 Paprsek ve vakuu [15]

1.4.1 Vytvoření svaru [10], [15], [17]

Materiály, které se svařují, musí být důkladně očištěny od veškerých nečistot a jejich svarová plocha musí mít drsnost $R_a = 0,8 - 1,6 \mu\text{m}$. Svarové plochy se důkladně odmastí, pokud by na svarové ploše zůstal malý kousek mastnoty, tak při ohřevu zplynuje a dojde k nežádoucím vadám, které jsou např.: bublinatost a pórovitost. Dalším krokem je, že se svarové plochy přiloží k sobě tak, aby mezera mezi nimi byla okolo 0,1 mm (obr. 9).

Šířka svařovacího paprsku se řídí podle šířky spáry. Průměr paprsku se pohybuje okolo čtyřnásobku šířky spáry, tak aby byla jistota úplného překrytí. Svařování probíhá velmi rychle a díky tomu je minimální tepelně ovlivněná oblast, a to v řádech desetin mm.



Obr. 11 Fáze vzniku key hole [10]

Při svařování se pouze výjimečně používá přídavný materiál. Většinou se obě svarové plochy roztaví a spojí pouze vlastním materiálem (obr. 11), díky tomu se svarový spoj málo odlišuje od základního materiálu.

U svařování svazkem elektronů dosahujeme dobrého vzhledu svaru. Je zde malá natavená a tepelně ovlivněná oblast svaru a díky tomu jsou minimální deformace. Pomocí vakua je svar dokonale chráněn před vzdušnou atmosférou. Svařování je velmi rychlé, protože se svařuje na jeden průchod paprsku. Může se svařovat mnoho různých materiálů a jejich kombinace. Svar není ovlivněn lidským činidlem, kvůli vysokému stupni automatizace.

Svařování svazkem elektronů sebou nese i několik nevýhod, a to svarové plochy se musí před svařováním přesně opracovat a důkladně očistit. Vytvoření vakua pro svařování je velmi dlouhé. Vedení svazku ve spáře musí být přesné. A nejdůležitějším faktorem jsou vysoké investiční náklady.

1.4.2 Svařitelnost materiálů [10], [17]

Díky tomu, že svařování svazkem elektronů probíhá ve vakuu, můžou se svařovat i velmi chemicky aktivní kovy jakou jsou např. titan, zirkonium, molybden, niob a wolfram.



Obr. 12 Svařený bronz a ocel v 30 mm [17]

Všechny tyto prvky mají vysokou afinitu ke kyslíku, vodíku a dusíku.

Svařování svazkem elektronů dokáže svařit i odlišné materiály (obr. 12).

Pokud se touto metodou bude svařovat nízkolegovaná nebo nízkouhlíková ocel musí být čistota materiálu velmi vysoká, hlavně obsah síry a fosforu musí být velice nízký.

2 ZKOUŠKY SVARŮ A MATERIÁLŮ [3], [13]

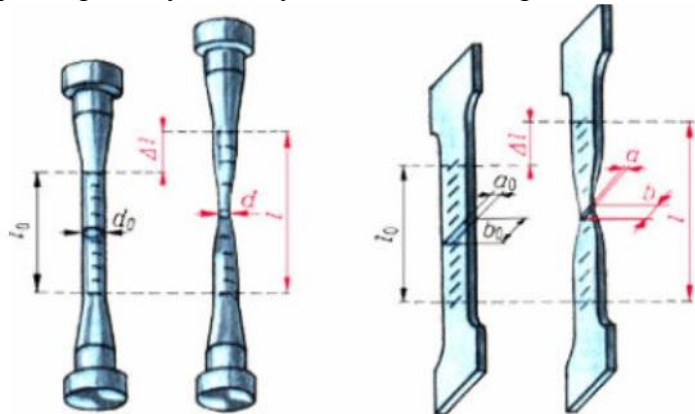
Zkoušky svarů a materiálů pomáhají určit jaký materiál má jaké hodnoty a na co se více hodí. Pomocí těchto zkoušek se dá určit, jestli materiál vydrží určité vnější vlivy jako je například vlhkost nebo teplota. Stejně tak se dá určit vnitřní struktura nebo defekty u materiálů.

Některé základní zkoušky, které jsou dále popsány:

- Zkouška tahem.
- Zkouška vrubové houževnatosti.
- Zkouška tvrdosti.
- Zkouška metalografická.

2.1 Zkouška tahem [3], [13]

Zkouška tahem je jednou ze základních zkoušek materiálů a svarů. Touto zkouškou lze prozkoumat pevnostní a plastickou charakteristiku. Zkoušený materiál je tyč o kruhovém průřezu nebo plochá tyč u zkoušení plechů, obě tyto tyče jsou normalizovány a jejich konce jsou upraveny tak, aby se materiál dal upnout do trhacího stroje (obr. 13). Parametry, jako je



Obr. 13 Zkušební tyče pro zkoušku tahem [3]

teplota a rychlost deformace, jsou u této zkoušky předem definovány. Zkouška začíná tak, že se do stroje vloží a upne zkušební tyč a ta je následně natahována mezi dvěma příčníky od nulového zatížení, do doby, kdy se zkušební tyč nerozlomí. Během tohoto zatížení je vykreslován diagram napětí – deformace, který se označuje jako klasický tahový diagram (obr. 14). Z tohoto diagramu se později vyhodnocují další údaje.

Prvním charakteristickým údajem, který se dá z tahového diagramu vyčíst je tzv. Hookuv zákon. Tento Hookuv zákon je hned na začátku diagramu, kdy je deformace lineárně závislá na napětí. Lze ho vyjádřit vzorcem:

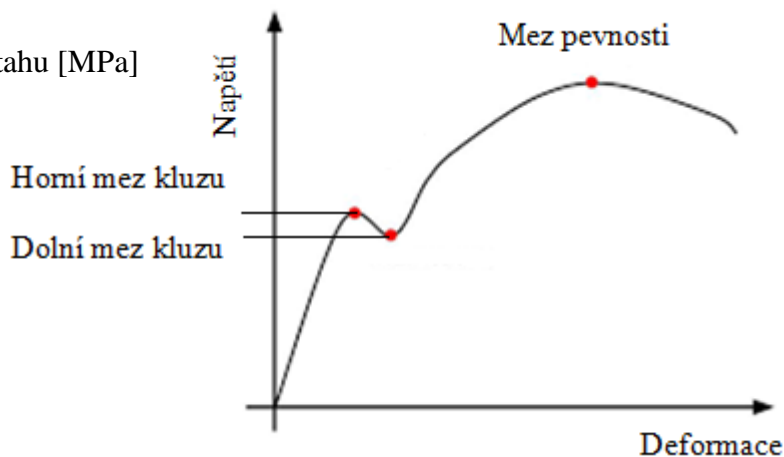
$$\sigma = \varepsilon \cdot E \quad (2.1)$$

σ – napětí [MPa]

ε – deformace [%]

E – modul pružnosti v tahu [MPa]

Dalším z údajů, které se dají z tahového diagramu vyčíst, je například mez kluzu. Mez kluzu se vyznačuje tím, že dojde k nárůstu deformace aniž by došlo k dalšímu zvyšování napětí. Občas dojde k poklesu napětí (obr. 14). Touto mezí kluzu se vyznačuje převážně měkká ocel. Vysocepevný materiál



Obr. 14 Tahový diagram [13]

má po lineárním průběhu křivku, která pokračuje parabolicky a dojde k nevýrazné mezi kluzu. Pro praxi se udává tzv. smluvní mez kluzu – $R_{p0,2}$. Aby se smluvní mez kluzu zjistila, udělá se rovnoběžka s lineárním průběhem zatížení, která je ve vzdálenosti 0,2 % deformace. S takto určenou mezí kluzu, která je rovnocenná reálné mezi kluzu, se může dále počítat. Vztah pro výpočet meze kluzu je:

$$R_e = \frac{L_e}{S_0} \quad (2.2)$$

R_e – mez kluzu [MPa]

L_e – zatížení na mezi kluzu [N]

S_0 – výchozí průřez tyče [m²]

Z tahového diagramu se dá zjistit maximální zatížení materiálu, které se nazývá mez pevnosti. Po této hranici dochází k poklesu zatížení a tvoří se krček na zkušební tyči a nakonec dojde k přetržení tyče. Mez pevnosti lze vypočítat ze vztahu:

$$R_m = \frac{L_m}{S_0} \quad (2.3)$$

R_m – mez pevnosti [MPa]

L_m – maximální zatížení [N]

S_0 – výchozí průřez tyče [m²]

Pomocí tahové zkoušky se zjišťují také plastické vlastnosti materiálu. Jednou z těchto vlastností je tažnost, která se zjistí ze vzorce:

$$A = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100 \quad (2.4)$$

A – tažnost [%]

l – měřená délka tyče po přetržení [m]

l_0 – výchozí měřená délka tyče [m]

U tažnosti jsou normované hodnoty. Tyto hodnoty se zjišťují pro dvě varianty tyčí. První varianta A_{10} je pro dlouhé tyče, kdy se výchozí průměr těla zkušební tyče vynásobí deseti. Druhá varianta A_5 je pro tyče krátké, kde se výchozí průměr těla zkušební tyče vynásobí pěti.

Další plastická vlastnost, která se dá zjistit pomocí tahové zkoušky je koncentrace neboli zúžení. Vztah pro koncentraci je:

$$Z = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Z – koncentrace [%]

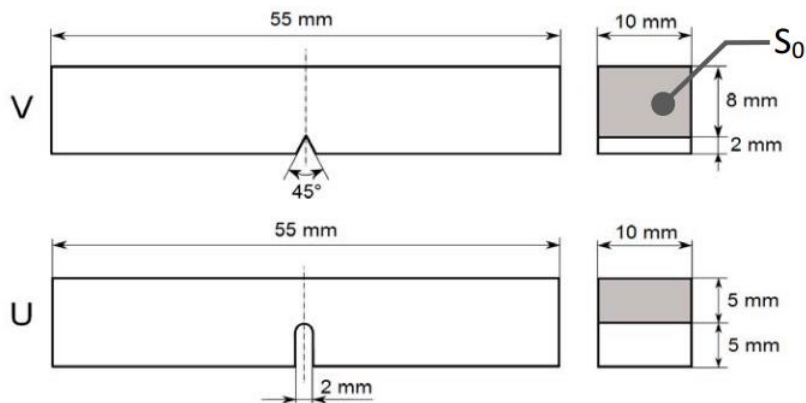
S – průřez tyče (krčku) po přetržení [m²]

S_0 – výchozí průřez tyče [m²]

Zkoušení svarových spojů je zvláštní u tahové zkoušky. Zatížení při zkoušce je kolmé k podélné ose svaru. Kvůli různému složení svarového spoje se zkouška bere pouze jako informativní. Velký význam má místo vzniku krčku, resp. kde dojde k přerušení zkušební tyče. U zkoušky svarů se tedy vyhodnocuje pouze hodnota meze pevnosti.

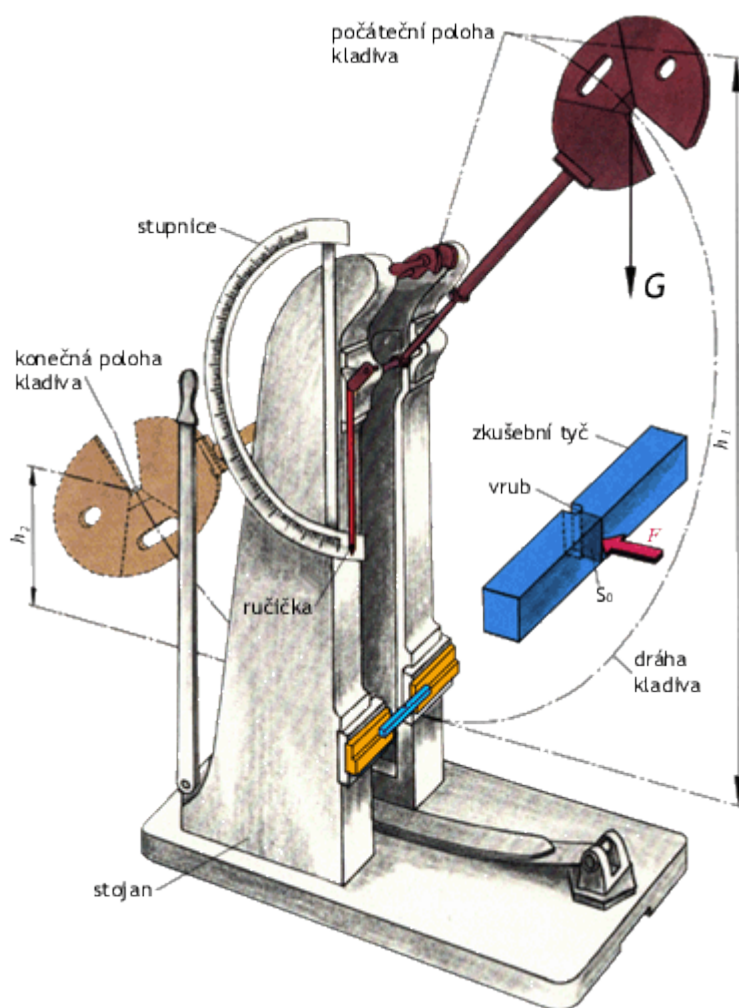
2.2 Zkouška vrubové houževnatosti [3], [4], [12]

Tato zkouška testuje materiál, jak velkou má schopnost odolávat křehkému porušení. Zkušebním vzorkem je normované tělísko o přesně předepsaných rozměrech (obr. 15). Na vzorku je vyroben vrub, který simuluje trhlinu v materiálu. Normálně se vyrábějí tři druhy vrubů, které mají svá jednotlivá označení jako je KCU3, kde tři je hloubka vrubu a U je typ vrubu. Dále jsou označení KCU2 a KCV, oba tyto vruby jsou hluboké dva milimetry, ale KCU2 je typ vrubu U a KCV je typ vrubu V.



Obr. 15 Rozměry zkušebního tělesa [12]

Zkouška se provádí na Charpyho kladivu (obr. 16). Provádí se tak, že se do stroje vloží zkušební vzorek. Vzorek se musí vložit tak, aby kladivo udeřilo do opačné strany než je vyhotovený vrub. Hmotnost kladiva je přesně určena. Po nárazu kladiva do vzorku je rázovou energií rozlomen. Na stroji se zaznamenává právě velikost nárazové práce a typ lomu v kořeni vrubu.



Obr. 16 Charpyho kladivo [4]

Ze zkoušky vrubové houževnatosti se udává nárazová práce nebo se tato práce vydělí nosným průřezem vzorku a udává se tato hodnota.

Další vyhodnocení je ze zkušebního vzorku, kde se určuje typ lomu po přeražení vzorku. Tomuto kritériu se říká procento křehkého lomu k jeho celkové ploše. Také se měří velikost bočního rozšíření vzorku po přeražení, a to v místě lomové plochy.

Obrovský vliv na výslednou nárazovou práci má teplota, proto se provádí více měření stejného materiálu, ale za různých teplot. Výsledky experimentů se poté graficky

zpracují a vytvoří se tzv. přechodové křivky. Většinou

bývá materiál za nižších teplot křehčí a méně tvárný.

2.3 Zkoušky tvrdosti [9], [20]

Zkoušky tvrdosti jsou dalšími základními zkouškami mechanických vlastností materiálů. U zkoušek tvrdosti se měří odpor materiálu ke statickému nebo dynamickému vnikání jiného tělesa. Statické zkoušky jsou Brinellova zkouška, tvrdost podle Vickerse a tvrdost podle Rockwella. Dynamické zkoušky jsou poldi kladívko a Shoreho odrazová zkouška.

2.3.1 Zkoušky tvrdosti – statické [3], [9], [20]

Základem statických zkoušek je v zatlačování vnikajícího tělíska (indentoru) do zkušebního materiálu. Pro každý typ zkoušky jsou předepsány rozměry a tvar indentoru, velikost zatížení a další podmínky.

Jednou ze základních statických zkoušek je Brinellova zkouška. Brinellova zkouška se vyznačuje tím, že je do vyleštěné plochy zatlačována ocelová kalená kulička (indentor) (obr. 17). Tato kulička má přesně předepsaný průměr, který může být 10; 5; 2,5; 2 a 1 mm. Nejčastěji se používá kulička o průměru 10 mm. Kulička se též může lišit v materiálu, ze kterého je vyrobena. Pro měkké materiály se používá kulička ze zakalené oceli, a pro předpokládané tvrdší materiály se používá kulička ze slinutého karbidu.

Po zatlačení a odlehčení, kdy se vytvořil zkušební vtisk, se musí povrch vzorku vhodně připravit. Není nutné příliš upravovat povrch. Pouze se povrch očistí od cizích těles, okují a mazadel.

Měření se může provádět dvěma způsoby, a to měřením hloubky vtisku nebo měřením průměru vtisku. Nejčastěji se používá měření průměru vtisku, protože je přesnější. Průměr vtisku se měří pomocí Brinellovy lupy, kde se dají odečíst až setiny milimetru.

Po změření průměru se tvrdost materiálu zjistí pomocí vzorce:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} = \frac{0,102}{\frac{\pi \cdot D}{2} \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2.6)$$

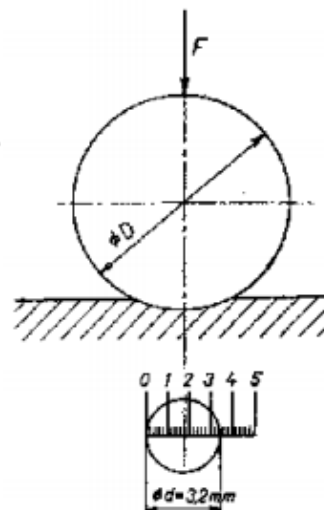
HB – tvrdost dle Brinella

F – zatěžující síla [N]

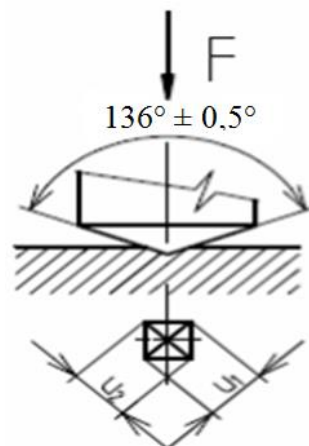
D – průměr kuličky [mm]

d – průměr vtisku [mm]

Druhou základní statickou zkouškou je tvrdost podle Vickerse. Tato zkouška se vyznačuje tím, že se pro zatlačování do materiálu používá čtyřboký diamantový jehlan a po zatlačení vznikají čtyřhranné vtisky, které jsou mělké (obr. 18). Kvůli tomu se obrobená plocha tolik nepoškozuje a naměřené hodnoty jsou přesné. Čtyřboký diamantový jehlan má vrcholové úhly stěn 136° proto, aby nevznikalo příliš velké tření, které by ovlivňovalo výsledek. Tento úhel se také zvolil kvůli tomu, aby se naměřené hodnoty tvrdosti dle Vickerse příliš nelišily od naměřených hodnot dle Brinella. U zkoušky dle Vickerse se nemusí rozlišovat tvrdost materiálu, všechny materiály mají jednotnou stupnici tvrdosti.



Obr. 17 Zkouška dle Brinella [20]



Obr. 18 Zkouška dle Vickerse [9]

Zatížení, která se provádějí u této zkoušky, mají velikost 9,8; 29,4; 49; 98; 294 a 490 N a doba kdy působí zatížení je 10 až 15 s. Po dokončení vtisku se změří obě úhlopříčky a vypočte se z nich aritmetický průměr, který se používá k výpočtu Vickersovy tvrdosti. Vzorec pro výpočet Vickersovy tvrdosti je:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} \quad (2.7)$$

HV – tvrdost dle Vickerse

F – zatěžující síla [N]

u – střední uhlopříčka vtisku [mm]

Nevýhoda mělkých vtisků, je u nehomogenních nebo hrubozrnných kovů, jako jsou šedá litina nebo ložiskové kompozice. U těchto kovů nejsou naměřené výsledky přesné. Další nevýhodou této metody je, že se musí povrch obrobit na určitou drsnost tak, aby se dalo měřit.

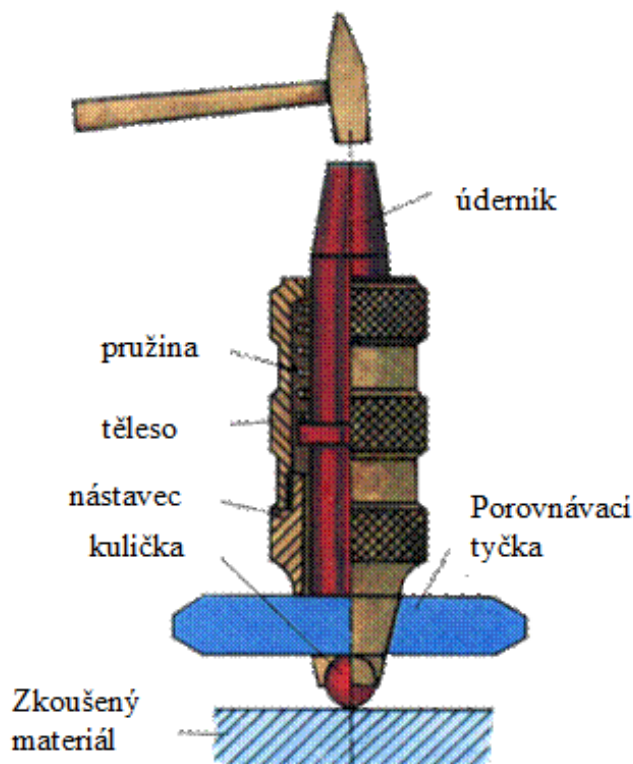
Třetí základní statická zkouška je tvrdost dle Rockwella, kde je jako indentor použit diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° a zaoblenou špičkou na 0,2 mm nebo je použita ocelová kulička. Tato metoda je určena pro sériovou kontrolu, a povrch zkušebního materiálu nemusí být upravený, protože hloubka vtisku se měří až po zatížení na 98N, kde se poté nastaví nula. Následně se zatíží hlavní silou viz. tab 1. Dále se odlehčí na původní hodnotu 98N a odečte se hodnota hloubky vtisku. Pokud by se hodnota odečítala při hlavním zatížení, zdálo by se tvrdost menší kvůli pružné deformaci vtisku nebo deformaci stojanu stroje. Pro měření měkkých ocelí se používá ocelová kulička z důvodu, že měření měkkých ocelí pomocí diamantového kužele není tak přesné.

Tab. 1 Parametry a použití pro zkoušku tvrdosti dle Rockwella [9]

Stupnice	Indentor	Zatížení [N]			Rozsah měřitelné stupnice		Použití
		F ₀	F ₁	F _c	Počet	Hloubka	
C	Diamantový kužel	98,07	1373	1471	100	0,20	Tepelně zpracované ocele a litiny
A			490,3	588,4			Slabé průřezy tvrdých kovů, slinuté karbidy
D			882,6	980,7			
15N 30 N 45 N		29,42	117,7 264,8 411,9	147,1 294,2 441,3		0,10	Velmi tenké součásti, povrchové vrstvy
B	Ocelová kulička Ø 1,588 mm	98,07	882,6	980,7	130	0,26	Neželezné kovy a oceli bez tepelného zpracování
G			1373	1471			Měkké oceli, neželezné kovy
F			490,3	588,4			
15 T 30 T 45 T		29,42	117,7 264,8 411,9	147,1 294,2 441,3	100	0,10	Velmi tenké součásti, měkké povrchy
H	Ocelová kulička Ø 1,588 mm	98,07	490,3	588,4	130	0,26	Hliník, cín, olovo
E			882,6	980,7			Litiny, hliníkové slitiny, ložiskové materiály a jiné měkké materiály
K			1373	1471			

2.3.2 Zkoušky tvrdosti – dynamické [3], [5], [9], [20]

První dynamická zkouška tvrdosti se provádí pomocí Poldi kladívka (obr. 19), tato zkouška je alternativa Brinellovy zkoušky. U Poldi kladívka je porovnávací tyčka tlačena pomocí pružinky na indentor, který má u této metody tvar kuličky o průměru 10 mm. Samotný princip



Obr. 19 Poldi kladívko [5]

velmi rychlé.

Další zkouška, která se používá pro dynamické zkoušky tvrdosti, je Shoreho odrazová zkouška. Při této zkoušce se používá Shoreho skleroskop (obr. 20). Indentor, který se používá u této zkoušky, je diamantový sférický hrot. Povrch zkoušeného materiálu musí být hladký. Tato zkouška je závislá na gravitačním zrychlení. Princip je takový, že se indentor umístí do výchozí polohy, potom se pustí kolmo na zkoušený materiál a až dopadne indentor na zkoušený materiál odrazí se a hodnota, do které vystoupal, je hodnota potenciální energie v dané výšce, ze které se určuje tvrdost zkoušeného materiálu. Zkouška se nesmí provádět vícekrát na jednom místě zkoušeného materiálu.

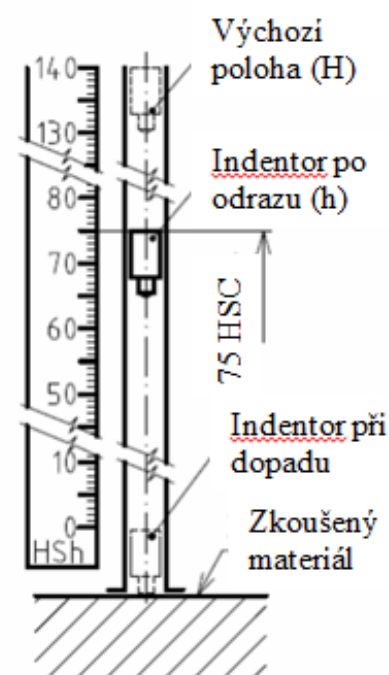
Tato zkouška, stejně jako zkouška pomocí Poldi kladívka, je výhodná z důvodů její mobility. Avšak nevýhoda u této zkoušky je tření ve vedení, proto není měření tak přesné.

zkoušky je takový, že se na zkoušený materiál přiloží kulička tak, aby osa tvrdoměru byla kolmá na osu zkoušeného materiálu. Pokud je tento krok hotový následuje úder ručním kladivem do úderníku. Velikost úderu může být libovolná, pokud se udeří málo, vznikne malý obtisk a pokud se udeří hodně, vznikne velký obtisk. Po tomto úderu se vytvořily dva obtisky, jeden se vytvořil na porovnávací tyčce a druhý na zkoušeném materiálu.

Vyhodnocení probíhá tak, že se změří průměr vtisku na porovnávací tyčce a průměr vtisku na zkoušeném materiálu pomocí lupy. Následně se v tabulkách vyhledá hodnota obou vtisků a určí se z nich tvrdost zkoušeného materiálu.

Pomocí této metody se dají ověřit vlastnosti u těžkých a rozměrných výrobků nebo se dá změřit tvrdost svarových spojů při montážních pracích.

Výhoda této metody spočívá v tom, že přístroj se může přenášet a měření je



Obr. 20 Shoreho skleroskop [9]

2.4 Metalografické šetření [6]

Pomocí metalografického šetření se ověřují mechanické vlastnosti, hlavně stav struktury svarových spojů. Před zkoušením vzorku se musí provést příprava zkušebního vzorku, která začíná od správného odběru, dále broušení zkoumaného povrchu na metalografických papírech až po jeho leštění, které může být elektrolytické nebo mechanické. Výsledek z metalografického šetření se ukazuje na fotografiích.

Metalografické šetření se rozděluje pomocí velikosti zvětšení, na makrostrukturní nebo mikrostrukturní.

Makrostrukturní rozbor se určuje pomocí pouhého oka nebo pomocí malého zvětšení. Pokud se zkoumá svarový spoj, hodnotí se tvar svaru, odmíšení svarového kovu, kladené svarové vrstvy a šířka, tvar tepelně ovlivněné oblasti.

Makrostrukturní rozbor se hodnotí pomocí dvou variant.

- První varianta využívá chemické reakce mezi vrstvou fotografického bromostříbrného papíru a mezi sulfidickými vměstky, které jsou v rovině výbrusu. Tato varianta hodnocení makrostruktury se nazývá Baumannův otisk. Pokud by se dělal další otisk na stejném povrchu, musí se znovu brousit a leštit povrch.
- U druhé varianty se používá leptání, které se nanese na předem vybroušený povrch. Činidlo musí být vhodné pro zkoumaný materiál, nejčastěji se používají roztoky persíranu amonného nebo kyseliny dusičné. Touto metodou se zkoumá primární krystalizace, nečistoty v oceli a posouzení jakosti svarového spoje. Metoda se nazývá Makrolept.

Mikrostrukturní rozbor se zabývá strukturou materiálu více do hloubky. Zvětšení povrchu může být 30x až 2 000x. Povrch před zkoumáním mikrostruktury vzorku se musí správně nalepat vhodným leptáním, často používaná leptadlem je Nital, který se používá pro nelegované nebo nízkolegované oceli a litiny. Pro vysocelegované oceli se používají speciální leptadla. Pomocí mikrostruktury se stanoví několik poznatků.

- Lze stanovit množství nekovových vměstků v ocelích, prozkoumat jejich typ, velikost a rozložení v oceli. Tomuto jevu se říká vměstkovitost a zkoumá se tak, že se porovná zorné pole mikroskopu s etalony daných norem.
- Dále pomocí mikrostrukturního rozboru můžeme stanovit plošný podíl strukturních fází, které se určují bodovou metodou. Aby se dokázali rozlišit strukturní složky, musí být zvětšení dostatečné. Hodnocení probíhá na matnici světelného mikroskopu, na které je položena transparentní fólie s vyrytou mřížkou.
- Z důvodu posouzení zrnitosti struktury se určuje velikost zrna. Je to velikost zhrubnutí austenitického zrna, po vlivech ohřevu na tvářecí teplotu a teplotu tepelného zpracování. U svarových spojů se určuje zhrubnutí pásem tepelně ovlivněné oblasti i svarového kovu. Zhodnocení se provádí pomocí porovnání vzorku s etalony příslušných norem.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část se zaměřuje na provaření kořene svaru pomocí plazmového svařování. Obě části rotoru jsou zhotoveny s osazením, z důvodu snadnějšího a přesnějšího vzájemného ustanovení, přes toto ustanovení se provede svar.

Pro svařování kořene, z důvodu náchylnosti vzniku vad se nejčastěji používá metoda TIG, ale při svařování kořene pomocí plasmového svařování dojde k hlubšímu protavení. Kvůli dobrému protavení vzniká u plazmového paprsku kapilára „Keyhole“. Díky této metodě se protaví spolehlivě celý kořen svaru.

3.1 Materiál a svařovací zařízení [8]

Zkušební vzorky jsou plechy o tloušťce 6 mm z žárupevné oceli 30 CrMoNiV 5-11. Chemické složení materiálu vzorků je v tab. 2 a mechanické vlastnosti materiálu vzorků tab. 3.

Tab. 2 Chemické složení [8]

C [%]	Mn [%]	S [%]	Mo [%]	V [%]	Si [%]	P [%]
0.27-0.31	0.3-0.8	0.007max	1.0-1.2	0.25-0.35	0.1 max	0.007max
Cr [%]	Ni [%]	Al [%]	As [%]	Sb [%]	Sn [%]	Cu [%]
1.1-1.4	0.50-0.75	0.01max	0.02max	0.0015max	0.01max	0.12max

Tab. 3 Mechanické vlastnosti při 20 °C [8]

Rp0,2[MPa]	Rm [MPa]	A5 [%]	Z [%]
min 550	700-850	40	20

Použité zařízení na svaření zkušebních vzorků bylo EUTRONIC GAP 3001 DC (obr. 21) - výrobce firma Castolin S.A., Švýcarsko

Parametry zařízení:

Napájení	3x400V
Napájecí frekvence	50/60Hz
Intenzita pilotního proudu	0,5 – 10A
Intenzita svařovacího proudu	0,3 – 160A
Napětí na prázdno	110V

Zařízení je vhodné pro:

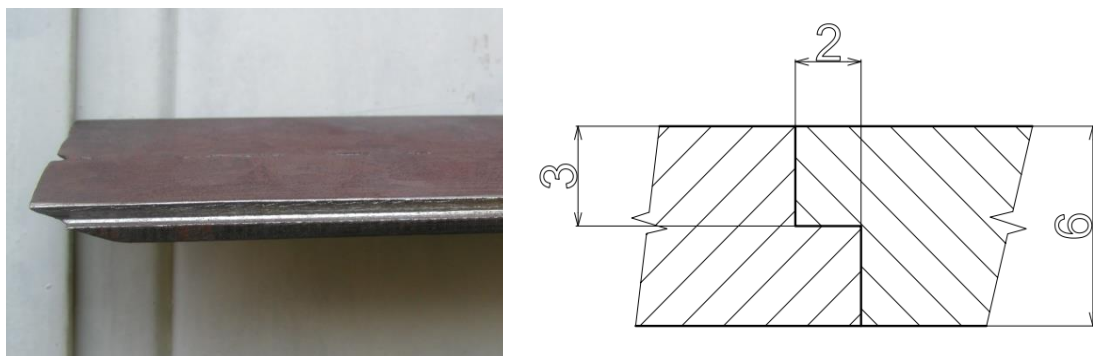
- svařování plazmovým paprskem key-hole
- navarování plazmou práškem
- svařování plazmovým paprskem studeným drátem
- TIG svařováním
- TIG svařováním studeným drátem.



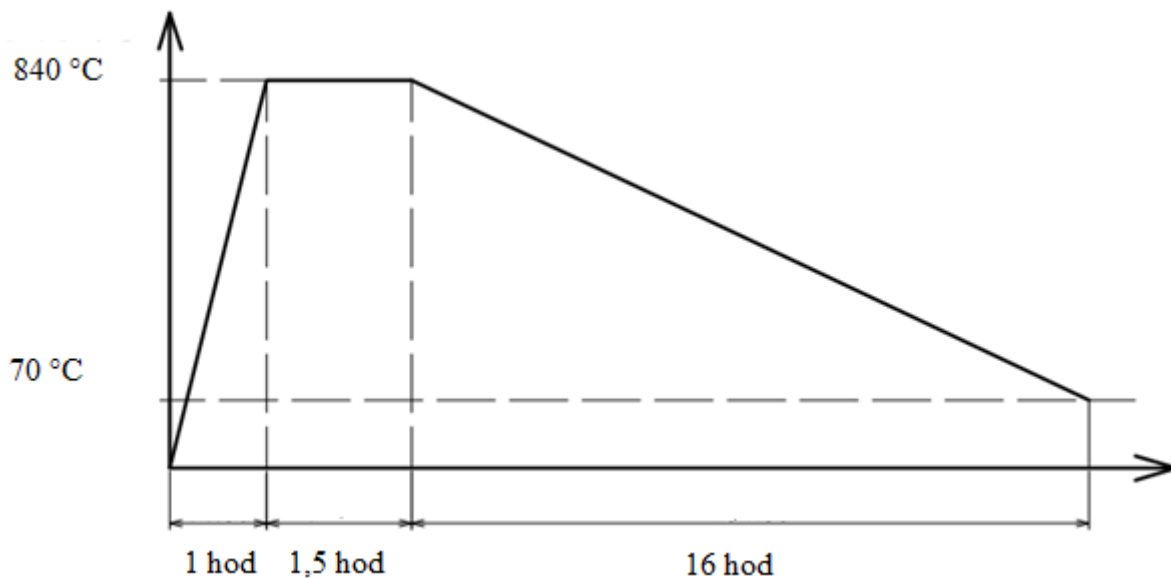
Obr. 21 Eutronic gap 3001 DC [8]

3.2 Provedení zkoušky [8]

U zkušebních plechů z materiálu oceli 30 CrMoNiV 5-11 se vyfrézovalo osazení, o velikosti a rozměrech (obr. 22). Z důvodu vysoké pevnosti vybraného materiálu se nechaly plechy vyžít (obr. 23), ještě před vytvořením drážek. U svařovaných vzorků bylo napětí o velikosti 30 V. Při zkoušce se nejvíce hledělo na kompletní protavení zámku.



Obr. 22 Osazení zkušebních vzorků, fotografie a rozměry [8]



Obr. 23 Průběh tepelného zpracování vzorků [8]

Detailnější záběr hořáku na svařovacím zařízení, kterým se svařovaly zkušební plechy (obr. 25). Zobrazení ohřevu základního materiálu před začátkem svařování (Obr. 24).



Obr. 25 Detail hořáku [8]



Obr. 24 Ohřev základního materiálu [8]

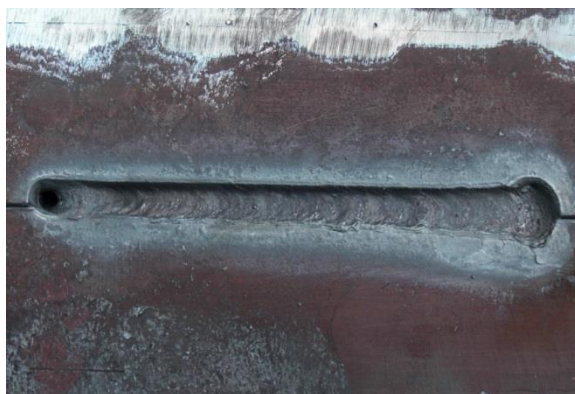
3.3 Hodnocení svarů v osazení [8]

Zkouška byla vykonána na dvou vzorcích, na obou vzorcích byly provedeny svary s odlišnými parametry svařování. Při svařování se muselo přehřívat, protože při svařování bez přehřevu se nepodařilo dostatečně protavit materiál a poté vytvořit Keyhole, hlavním kritériem tedy bylo dodržet teploty přehřevu. Jako ochranný plyn u svařování byla použita směs argonu a vodíku (7% H₂; 93% Ar) a plazmový plyn byl použit argon. Aby došlo k protavení materiálu a následné tvorbě Keyhole, byl hořák po dobu 5 až 10 sekund po zapálení oblouku nechán bez posuvu u všech provedených svarů.

Tab. 4 Svařovací parametry [8]

číslo svaru	svařovací proud I (A)	posuv (cm/min)	tryska průměr (mm)	plyn plazmový (l/min)	plyn ochranný (l/min)	teplota přehřevu (°C)
Vzorek I - vzdálenost trysky od materiálu 5 mm						
1	45	10	1,2	1	10	300
2	45	10	1,2	1,2	10	
3	45	8	1,2	1,2	10	350
4	45	8	1,2	1,25	10	
Vzorek II - vzdálenost trysky od materiálu 4 mm						
1	45	8	1,2	1,25	10	300
2	45	8	1,2	1,25	10	350
3	45	8	1,2	1,4	10	380

Každý provedený svar měl své parametry svařování tab. 4. Svary s nejlepší jakostí byly na vzorku II, a to svar 2 (obr. 26) a svar 3 (obr. 27). Při svařování obou svarů byla vysoká teplota přehřevů, která měla dobrý vliv na kvalitu svarů. U svaru 3 byl také zvýšen průtok plynu a díky této kombinaci bylo dosaženo nejstabilnějšího protavení. Z důvodu vůle v osazení je možné na obrázcích 26 a 27 vidět propadnutí povrchu svarů. Toto propadnutí nemá vliv na pevnost svaru, protože na svar budou navařovány další vrstvy pomocí metody svařování pod tavidlem. Při svařování kořene nebyl použit formovací plyn, z toho důvodu došlo k velkému zoxidování kořene.



Obr. 27 Povrch svaru - vzorku II svar 3 [8]



Obr. 26 Povrch svaru - vzorku II svar 2 [8]

U jednoho ze svarů je vidět nedostatečně protavený zámek (obr. 28). Na dalších obrázcích 29 a 30 je jasně patrný protavený Keyhole na konci svaru. Při pohledu na povrch svaru (obr. 30) je zřetelně vidět protavení Keyhole o průměru 4,2 mm a při pohledu na kořen svaru (obr. 29) je dobře viditelné protavení Keyhole o průměru 1 mm. Z těchto dvou uvedených obrázků je jasně patrné umístění svaru vzhledem k vytvořenému zámku, obě osy jsou shodné, a to jak osa svaru, tak osa osazení.



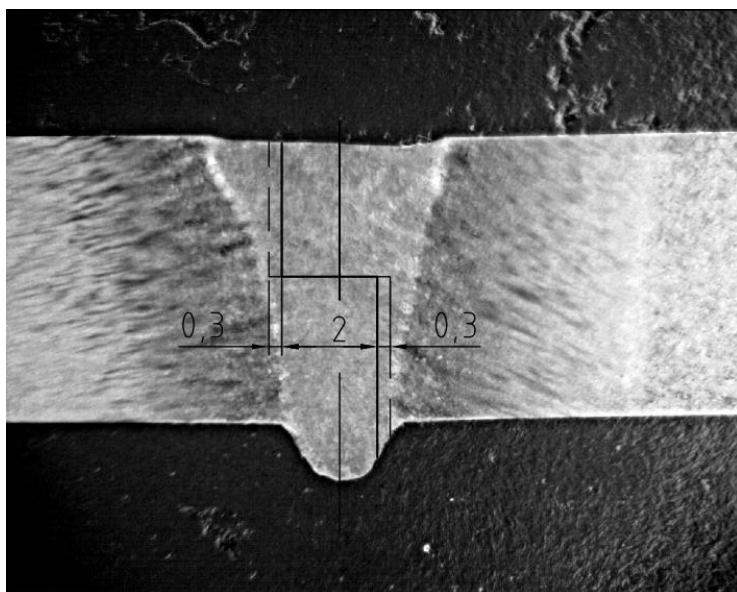
Obr. 28 Nепrotavený zámek [8]



Obr. 30 Klíčová dírka na povrchu svaru [8]



Obr. 29 Klíčová dírka u kořene svaru [8]



Obr. 31 Poloha svaru vůči osazení [8]

U dalšího pokusu svařování se osazení zámku umístilo 2 mm od sebe, díky této vzdálenosti a správnému umístění osazení zámku došlo u tohoto svaru ke kompletnímu provaření (obr. 31).

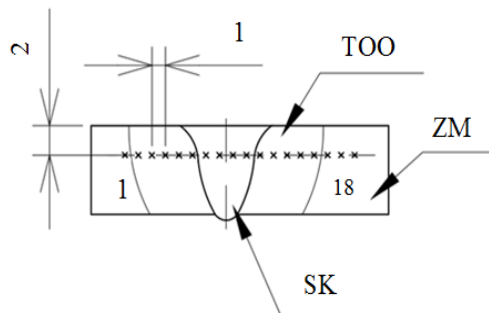
Touto variantou svaření bylo zjištěno, že pro účely vystředění částí rotorů vůči sobě je šířka dostačující.

3.4 Měření tvrdosti vzorku [8]

U vytvořeného svaru se provádělo měření tvrdosti, ve svaru a v tepelně ovlivněné oblasti. Rozmístění měřících vpichů (obr. 32) bylo od základního materiálu přes tepelně ovlivněnou oblast a zpět k základnímu materiálu. Jednotlivé vpichy jsou od sebe vzdálené 1 mm a každý vpich má různou tvrdost, podle toho jak byl materiál ovlivněn tab. 5. Svařovaný materiál, na kterém bylo prováděno měření tvrdosti, byl s předehřevem 380 °C.

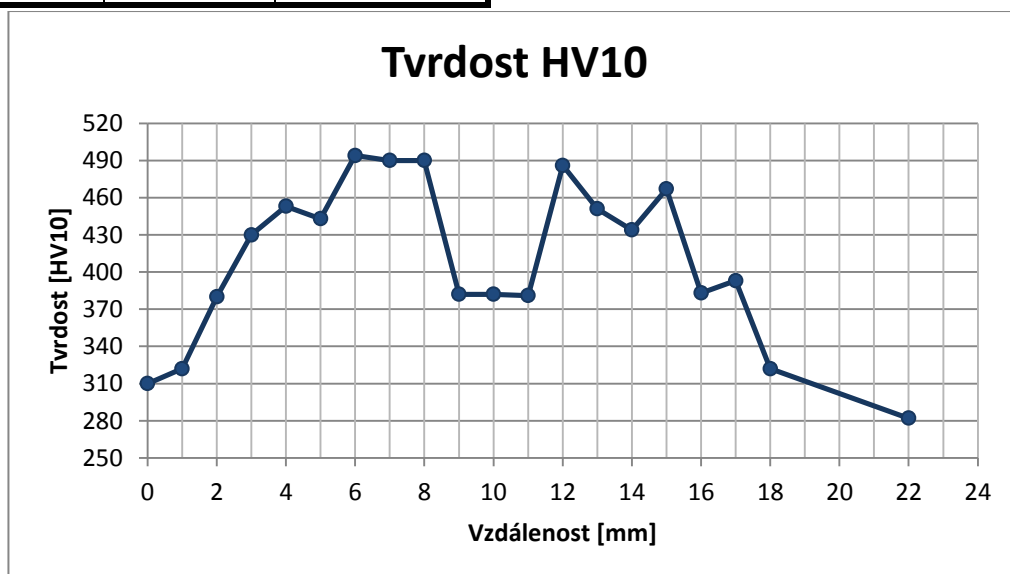
Tab. 5 Hodnoty měření mikrotvrdosti HV10 [8]

	č. měření	vzdálenost [mm]	tvrdost HV10
ZK	1	0,0	310
	2	1,0	322
	3	2,0	380
	4	3,0	430
TOO	5	4,0	453
	6	5,0	443
	7	6,0	494
	8	7,0	490
	9	8,0	490
SK	10	9,0	382
	11	10,0	382
	12	11,0	381
TOO	13	12,0	486
	14	13,0	451
	15	14,0	434
	16	15,0	467
	17	16,0	383
ZK	18	17,0	393
	19	18,0	322
	20	22,0	282



Obr. 32 Umístění měřených bodů [8]

Podle vykreslené křivky grafu tvrdosti (obr. 33) je jasné viditelné, že nejmenší tvrdost je na základním materiálu, který nebyl vystaven vysoké teplotě při svařování, zatím co nejvyšší tvrdost byla naměřena v tepelně ovlivněné oblasti. Takto vysoké tvrdosti se dosáhlo díky tomu, že materiál, který byl svařován, se nejprve předehřál na 380 °C.



Obr. 33 Průběh tvrdosti HV10

3.5 Mikrostruktura [8]

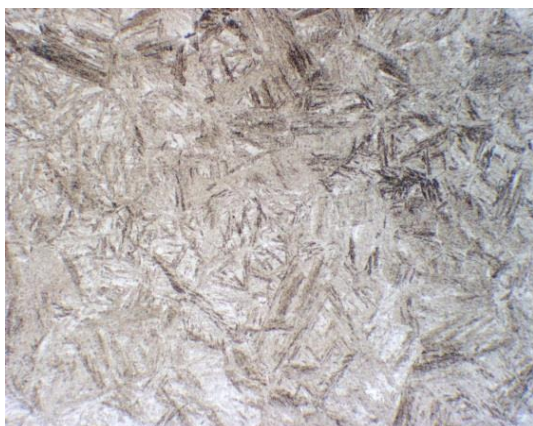
U svařeného materiálu, který byl před svařováním vyžíhán (obr. 23), se zjišťovala změna struktury na několika místech, které byly vystaveny působení vneseného tepla ze svařování. Zkoumaný vzorek byl pomocí mikroskopu zvětšen 500x.

Na snímku svarového kovu (obr. 34) je vidět martenzitická struktura, stejně tak na dalších snímcích tepelně ovlivněné oblasti (TOO1 a TOO2) (obr. 35 a 36). Nejjemnější martenzitická

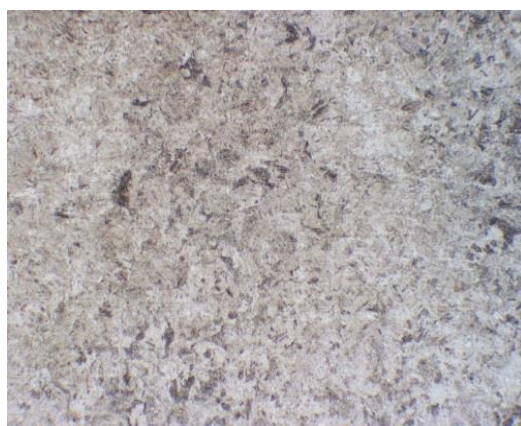


Obr. 34 Svarový kov [8]

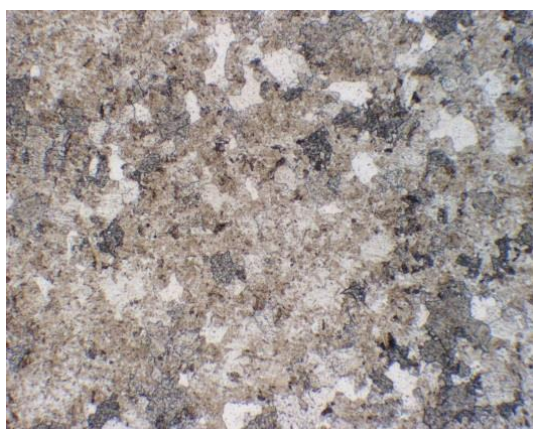
struktura je v tepelně ovlivněné oblasti, která leží nejbližší k základnímu materiálu (obr. 35). Hrubší martenzitická struktura je v tepelně ovlivněné oblasti blíže u svarového kovu (obr. 36) a nejhrubší martenzitická struktura se nachází ve svarovém kovu (obr. 33). V místě, kde se nachází přechod z tepelně ovlivněné oblasti na základní materiál je směs martenzitu se strukturou základního materiálu (obr. 37). Základní materiál má strukturu feriticko-perliticko-bainitickou (obr. 38). Na snímku je vidět ferit, který je zobrazen jako bílá zrna (obr. 38). Perlit se změnil na ferit, z důvodu působení vysokých teplot.



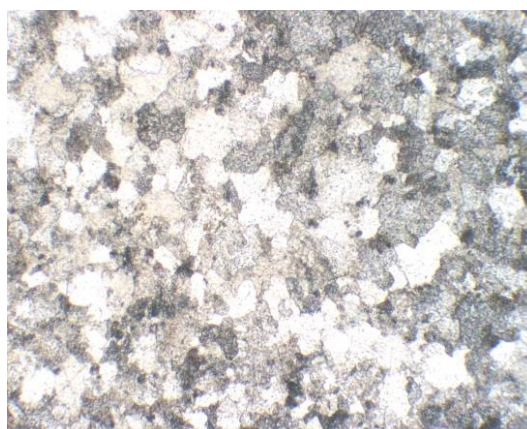
Obr. 36 TOO1 [8]



Obr. 35 TOO2 [8]



Obr. 37 Přechod z TOO2 na ZM [8]



Obr. 38 Základní materiál [8]

4 ZÁVĚRY

Z několika provedených svarů, byl vybrán jeden, který nejlépe odpovídal požadavkům k protavení zámku. K nejlepšímu protavení došlo u svaru 3 na druhém svařovaném vzorku, a to díky nastavení vyššího průtoku ochranného plynu a vyšší teplotě předehřevu.

Následně bylo vyhodnoceno, že technologie svařování kořene pomocí plazmového svařování u spojování rotorů turbín je vhodná a lze ji doporučit. Jak již bylo řečeno, kvůli dodržení souosého sestavení se na obou částech rotoru vytvořilo osazení, přes které se vedl svar. U svaru došlo k velkému propadnutí povrchu svaru, z důvodu vůlí v zámku, ale jelikož další postup je svařování pod tavidlem, tak toto propadnutí nevadí. Vyhodnocení svarů dokázalo, že protavení zámku plazmou je dostačující, svar je celistvý a bez jiných vad, které by mohl způsobovat zhotovený zámek. Důležité je, k vytvoření dobrého svaru, dodržet umístění svaru vzhledem k zámku a dostatečně předehřát materiál. Také je nutné chránit kořen svaru dost velkým průtokem formovacího plynu.

Dále se zjišťovala změna tvrdosti od základního materiálu přes tepelně ovlivněnou oblast a svarový kov. Toto měření se provádělo metodou HV10. Nejvyšší naměřená tvrdost byla v tepelně ovlivněné oblasti (490HV) zatímco nejnižší naměřená tvrdost byla v základním materiálu (282HV), který nebyl vystaven vysoké teplotě při svařování. K tak vysoké tvrdosti došlo také z důvodu předehřevu materiálu na teplotu 380°C.

Nakonec se vyhodnocovala mikrostruktura vzhledem k působení vysokých teplot při svařování. Nejjemnější martenzitická struktura je v tepelně ovlivněné oblasti, která leží nejbližší k základnímu materiálu a nejhrubší martenzitická struktura se nachází ve svarovém kovu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1]

1. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
2. DANĚK, Ladislav, Jaroslav KUBÍČEK, Tomáš PODRÁBSKÝ a Martin JULIŠ. *Problematika svařování žáropevných ocelí pro energetická zařízení*. 1. Brno: TESYDO, s.r.o, Mariánské nám., 2014, 95 s. ISBN 978-80-87102-10-7.
3. DRIML, Bohuslav. *Základní vlastnosti materiálů a jejich zkoušení* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://docplayer.cz/84444-4-zakladni-vlastnosti-materialu-a-jejich-zkouseni.html#show_full_text
4. CHLUD, Dušan. *Zkouška rázová ohybová vrubová* [online]. Zlín [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.strojari.wz.cz/kom/razova_zkouska.htm
5. CHLUD, Dušan. *Zkoušky tvrdosti - Poldi kladivo* [online]. Zlín [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.strojari.wz.cz/kom/poldi.htm>
6. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001, 298 s. ISBN 80-857-7185-3.
7. KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001, 395 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
8. KUČERA, Drahošlav. *Siemens technická zpráva*. Brno, 2010, 20 s.
9. MACHÁČ, Miroslav. *Měření tvrdosti materiálů a zpracovávání zjištěných hodnot* [online]. Brno, 2010, 73 s. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27306. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Milan Kalivoda.
10. MRŇA, RNDr. Libor Ph.D. *Svařování svazkem elektronů* [online]. Brno, 2013, 32 s. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/hsv__specialni_metody_svarovani__svarovani_svazkem_elektronu_2013__mrna.pdf
11. OMICRON. *Svářecí stroje* [online]. Třebíč, 2014 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://www.omc.cz/prilohy/GAMA_1500D-1900D_HF.pdf
12. OVMT, Odborné vzdělávání s moderní technikou. *Dynamické zkoušky* [online]. 2002 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/dynamicke_zkousky.pdf
13. OVMT, Odborné vzdělávání s moderní technikou. *Mechanické zkoušky* [online]. 2002 [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova_zkouska.pdf
14. PALÁN, Marek. *Svařování rotorových materiálů* [online]. Brno, 2014, 46 s. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30293766.pdf>. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
15. PRO-BEAM. *Fascination Electron Beam* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: www.pro-beam.com
16. *Příručka pro svařování pod tavidlem: Technická příručka ESAB*. Překlad z angl. originálu r. č. XA00136020.

17. SKALKA, Jan. *Technologie svařování svazkem elektronů* [online]. Brno, 2014, 41 s. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30294039.pdf>. Vysoké učení technické. Vedoucí práce Ing. Tomáš Richter.
18. Svařování pod tavidlem. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Svařování_pod_tavidlem
19. TURŇA, M. *Špeciálne metódy zvárania*. 1. Bratislava: ALFA, 1989, 384 s. ISBN 20-05-00097-9.
20. *Zkoušky tvrdosti* [online]. Plzeň [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
d	Průměr	[mm]
D	Průměr	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Síla	[N]
h	Poloha po odrazu	[mm]
H	Výchozí poloha	[mm]
I	Proud	[A]
l	Měřená délka tyče po přetržení	[m]
l_0	Výchozí měřená délka tyče	[m]
L_e	Zatížení na mezi kluzu	[N]
L_m	Maximální zatížení	[N]
R_a	Drsnost povrchu	[μm]
R_e	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti	[MPa]
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	[MPa]
S	Průřez tyče po přetržení	[m ²]
S_0	Výchozí průměr tyče	[m ²]
u	Střední úhlopříčka	[mm]
Z	Koncentrace	[%]
ε	Deformace	[%]
σ	Napětí	[MPa]

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
HB	Tvrdost dle Brinella
HSC	Stupnice Shore
HSh	Tvrdost podle Shorea
HV	Tvrdost dle Vickerse
KCU2	Druh vrubu u zkoušky vrubové houževnatosti
KCU3	Druh vrubu u zkoušky vrubové houževnatosti
KCV	Druh vrubu u zkoušky vrubové houževnatosti
PA	Poloha svařování
PB	Poloha svařování
SK	Svarový kov
TIG	Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
WIG	Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu
ZM	Základní materiál

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Rotor turbíny [19].....	9
Obr. 2 Princip svařování WIG [7]	10
Obr. 3 Svařovací hořák [11]	11
Obr. 4 Princip plazmového hořáku [7]	12
Obr. 5 Úpravy svarových ploch pro plazmové svařování [7]	13
Obr. 6 Princip technologie svařování pod tavidlem [18].....	14
Obr. 7 Svařování do úzké mezery 1. Varianta [7]	15
Obr. 8 Svařování do úzké mezery 2. Varianta [7]	15
Obr. 9 Zařízení pro svařování svazkem elektronů [10]	16
Obr. 10 Paprsek ve vakuu [15]	16
Obr. 11 Fáze vzniku key hole [10]	17
Obr. 12 Svařený bronz a ocel v 30 mm [17].....	17
Obr. 13 Zkušební tyče pro zkoušku tahem [3].....	18
Obr. 14 Tahový diagram [13]	18
Obr. 15 Rozměry zkušebního tělesa [12].....	20
Obr. 16 Charpyho kladivo [4].....	20
Obr. 17 Zkouška dle Brinella [20]	21
Obr. 18 Zkouška dle Vickerse [9].....	21
Obr. 19 Poldi kladívko [5]	23
Obr. 20 Shoreho skleroskop [9]	23
Obr. 21 Eutronic gap 3001 DC [8]	25
Obr. 22 Osazení zkušebních vzorků, fotografie a rozměry [8]	26
Obr. 23 Průběh tepelného zpracování vzorků [8]	26
Obr. 24 Ohřev základního materiálu [8]	26
Obr. 25 Detail hořáku [8].....	26
Obr. 26 Povrch svaru - vzorku II svar 2 [8].....	27
Obr. 27 Povrch svaru - vzorku II svar 3 [8].....	27
Obr. 28 Neprotavený zámek [8]	28
Obr. 29 Klíčová dírka u kořene svaru [8]	28
Obr. 30 Klíčová dírka na povrchu svaru [8]	28
Obr. 31 Poloha svaru vůči osazení [8]	28
Obr. 32 Umístění měřených bodů [8]	29
Obr. 33 Průběh tvrdosti HV10	29
Obr. 34 Svarový kov [8]	30
Obr. 35 TOO2 [8]	30
Obr. 36 TOO1 [8]	30
Obr. 37 Přejít z TOO2 na ZM [8].....	30
Obr. 38 Základní materiál [8]	30

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry a použití pro zkoušku tvrdosti dle Rockwella [9]	22
Tab. 2 Chemické složení [8]	25
Tab. 3 Mechanické vlastnosti při 20 °C [8]	25
Tab. 4 Svařovací parametry [8]	27
Tab. 5 Hodnoty měření mikrotvrdosti HV10 [8]	29

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Svařování pod tavidlem: Kombinace tavidlo - drát [7]

Tab. 5. Svařování pod tavidlem — doporučené kombinace tavidlo—drát

Vhodné kombinace drát—tavidlo [68]							
Pevnostní třída oceli		Druh drátu		Tavidlo		Vrubová houževnatost svarového kovu	
R_m (MPa)	R_e (MPa)	ČSN-ŽAZ		ČSN-ŽAZ		KCU 2 — 10 °C (J . cm ⁻²)	KCU 2 — 40 °C (J . cm ⁻²)
480	350 až 400	A 0	A-102	VÚZ-1H	F-106	85	71
520		A 1	A-106	VÚZ-1H	F-106	71	61
550	400 až 450	A 0	A-102	VÚZ-48M	F-107	53	47
	450 až 500	A 2	A-106	Z-41	F-102	82	72
600	500 až 550	A 2	A-106	VÚZ-34Mn	F-103	81	69
650	550 až 600	A 2	F-106	VÚZ-48Mn	F-107	88	79
		ARV	A-215	VÚZ-4BaF	F-202	78	66
700	600 až 650	A 4	A-203	VÚZ-1H	F-106	69	64
		A 4	A-203	Z-41	F-102	81	74
750	650 až 700	A 4	A-203	VÚZ-34Mn	F-103	79	74
		ARV 2	A-343	VÚZ-1H	F-106	67	54
800	700 až 800	ARV 2	A-343	VÚZ-2Ba	F-302	63	33